

The YAG Laser Texturing Technology and Application with Controllable Disorder Distribution

Hongcai Wang, Yang Wang
School of Mechatronics Engineering
Harbin Institute of Technology
Harbin, China
whongc@sina.com

Hongcai Wang, Jian Zhan, Mingjing Yang
Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences
Beijing, China
zhanjian000@gmail.com

Abstract—The special morphology of spots isolated from each other could lead the laser texturing (LT) sheet to better stamping and coating properties, compared with shot Blast texturing (SBT) sheet and Electro-discharge Texturing (EDT) sheet. While the spots with regular distribution caused the laser texturing sheet appearing fringes easily. There were three methods to achieve YAG laser texturing disorder distribution spots, including controlling disorder delay, controlling disorder deflection, and controlling disorder image carving, which could reach the disorder spots texturing effect of EDT, and resolve the fringes problem of laser texturing. JM-3000 YAG laser texturing equipment was composed by mechanical system, laser system, controlling system, the outside optical system, frequency conversion cooling system and protection gas system, which achieved the disorder spots distribution of YAG laser texturing.

Keywords—YAG laser-texturing; Spots distribution; Controllable distribution; Controllable disorder distribution

I. 引言

在国民经济中钢板是应用最广泛的钢材，是多种工业部门的基础原料。钢板的轧制方法分为热轧和冷轧两大类。与热轧带钢相比，冷轧带钢具有厚度与板形精度高、表面质量好、力学性能好、厚度更薄的优点。冷轧带钢按粗糙度分为光面板和毛化板。光面板因冲压时容易划伤，涂镀层与基板的结合力弱，其冲压性能和涂镀性能比较差，无法用作汽车的外覆件及其他用途的涂镀板。毛化板具有优良的冲压性能和涂镀性能，是一种具有高附加值的产品，是汽车工业、家电产业等的重要原料。

毛化板由毛化轧辊复制而来。轧辊毛化技术就是对磨光轧辊进行毛化，使其表面具有特殊形貌的技术。目前的轧辊毛化技术包括喷丸毛化 (SBT)^[1]、电火花毛化 (EDT)^[2]、激光毛化 (LBT 或 LT)^[3,4]、电子束毛化 (EBT)^[5]、精细毛化 (Preussag Texturing)^[6,7]、喷墨毛化 (Ink Jet Texturing, 简称 IJT) 和激光诱导放电毛化 (Laser Guiding Discharge Texturing)^[8-11]等几种。目前在工业上得到规模化推广应用的轧辊毛化技术是 SBT、EDT 和 LBT，其中比较先进的是 EDT 和 LBT，其他毛化技术还处在试用阶段。

激光毛化板因其微坑彼此孤立的特殊形貌使其具有比喷丸毛化板和电火花毛化板更优良的冲压性能和涂镀性能。激光毛化板具有更好的冲压性能和涂镀性能，比喷丸毛化板和电火花毛化板更优质^[12]。目前，普通汽车的外覆件都采用毛化板，其中中高级汽车的外覆件一般用激光毛化板。激光毛化板被称为“镜面板”，其涂漆光亮度接近光面板。

激光毛化技术是第三代轧辊毛化技术，起源于 20 世纪 80 年代，由比利时冶金研究中心 (CRM) 首先研制成功。激光毛化按使用的激光器种类分为 CO₂ 激光毛化和 YAG 激光毛化。

YAG 激光毛化轧辊技术是中国科学院力学研究所近 20 年逐步研发的集激光、声光调制、自动控制、计算机和材料表面处理等先进技术于一体的一种高新技术，具有自主知识产权。该技术及应用获得了 2007 年度中国国家技术发明二等奖，1997 年获中国专利局与世界知识产权组织联合颁发的“中国专利发明创造金奖”。

YAG 激光毛化基本原理：连续泵浦 YAG 激光器经 Q 开关特殊调制输出高能量密度 ($10^4 \sim 10^6 \text{W/cm}^2$)、高重复频率 (每秒数千至数十万次) 的脉冲激光，通过沿轧辊轴向匀速移动聚焦镜将脉冲激光聚焦到匀速旋转的轧辊表面，使轧辊表面熔化、气化，产生大量的熔池；一定成份、一定压力的辅助气体沿一定角度侧吹熔池，使熔池凸台明显；轧辊自身热传导作用使熔池因熔融物迅速冷却而表面硬化；从而在整个辊面形成一定形貌的大量有凸台的硬化微坑。复制到冷轧薄板，形成激光毛化冷轧薄板。

在 CO₂ 激光毛化中，连续激光经斩波器的高速通断光路变成高频脉冲激光。由于斩波器的机械惯量，斩波器与轧辊旋转相位的精确同步比较困难，实现微坑沿轧辊圆周的位置可控难度比较大。CO₂ 激光毛化轧辊微坑分布至今只能实现一维可控。图 1 是 CO₂ 激光毛化毛化轧辊表面形貌图。最初的 YAG 激光毛化轧辊微坑分布也是一维可控的。图 2 是一维 YAG 激光毛化毛化轧辊表面形貌图。为了增加微坑分布的各向均匀度，调节冷轧板的各向延伸

率，中科院力学所开发了 YAG 激光毛化的二维可控分布技术。图 3 是二维 YAG 激光毛化毛化轧辊表面形貌图。

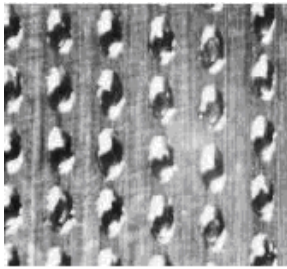


图 1 CO₂激光毛化轧辊表面形貌图

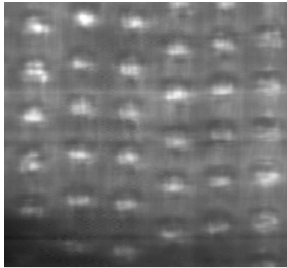
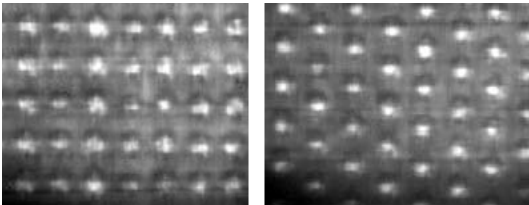


图 2 一维可控 YAG 激光毛化轧辊表面形貌图



a) 矩形分布 b) 菱形分布

图 3 二维可控 YAG 激光毛化轧辊表面形貌图

YAG 可控分布技术的基本原理^[13,14]：利用 YAG 激光毛化由控制声光电源的电信号控制激光器发光脉冲，响应速度很快，光脉冲只滞后电信号几微秒的特点，通过检测装置（高精度高分辨率编码器）测量轧辊的位置，用工控机通过可控分布接口卡和可控分布软件对检测信号在线变频处理后产生控制声光电源的电信号，声光电源控制激光器发出光脉冲，精确控制轧辊毛化点的圆周向间距，同时通过机床丝杠驱动聚焦头移动精确控制毛化点的轴向间距，从而实现二维可控分布。

由于微坑的规则分布，激光毛化板有以下缺点：（1）激光毛化板容易出现条纹。规则的微坑分布导致各向微坑分布的视觉差异；（2）激光毛化板容易出现光干涉条纹。轧机平整过程中上下轧辊两个周期性的规则图样之间的光干涉产生“莫尔条纹”现象。

对于毛化轧辊，接近各向均匀的无规则分布是最理想的微坑分布形式，现有的毛化技术，只有电子束毛化能够实现，而电子束毛化运行条件苛刻，设备成本和运行成本都很高，至今没有推广应用。国家重点科技攻关项目——“冷轧薄钢板激光毛化”的主要目标是开发汽车外覆件用激光毛化板。需解决的一个重要问题是改善激光毛化板冲

压、润滑、涂镀和外观质量等方面的各向异性。其关键之一是改善激光毛化板微坑分布的各向异性。

二维可控分布技术虽然可实现比一维可控分布技术更为均匀的微坑分布，但是，其分布也更规则。规则分布容易出条纹和“莫尔条纹”现象，会严重影响毛化板的外观质量，而无规则分布可消除轧制条纹。工程中有相当多的毛化板要求微坑无规则分布。为了改善激光毛化板的外观质量，有必要在二维可控分布技术的基础上开发可控无规则分布技术，实现电子束毛化的无规则微坑分布的效果。

II. 可控无规则分布原理

A. 可控无规则延时方法^[15]

在二维可控分布激光毛化设备中增加一套伪随机延时装置。伪随机延时装置的输出和输入信号均为脉冲信号，输出信号由输入信号的上升沿触发，经延时后输出，其延时时间在某一时间范围内按伪随机信号变化。原可控分布信号经伪随机延时装置后产生伪随机延时，从而使毛化微坑在轧辊表面的圆周方向形成无规则分布。图 4 是随机延时毛化示意图，图 5 是随机延时 YAG 激光毛化轧辊表面形貌示意图。

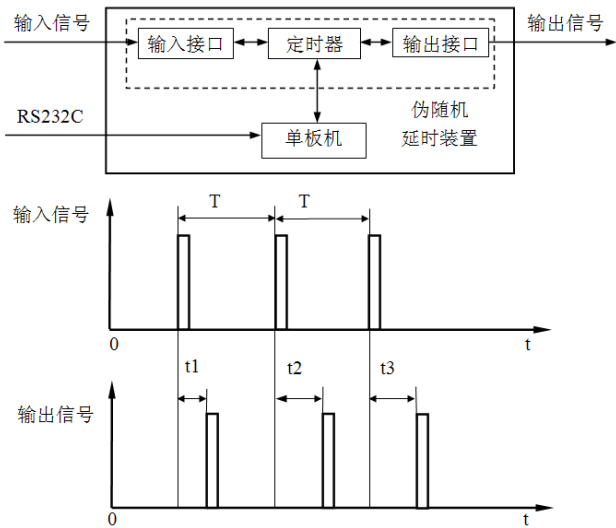
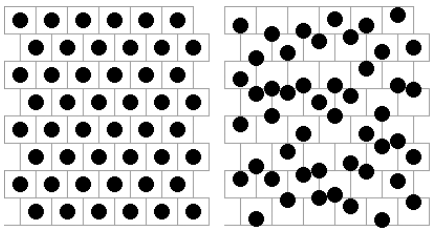


图 4 随机延时毛化示意图



a) 无延时 b) 有延时

图 5 随机延时 YAG 激光毛化轧辊表面形貌示意图

B. 可控无规则偏转方法^[16]

在二维可控分布激光毛化设备中增加一套伪随机偏转装置。伪随机偏转装置由伪随机信号发生器、接收伪随机

信号发生器信号的振镜电机驱动器和随振镜电机驱动器输出信号动作的振镜总成组成。原可控分布信号经伪随机偏转装置后产生伪随机偏转,从而使毛化微坑在轧辊表面的圆周方向或轴向形成无规则分布。图 6 是随机偏转毛化示意图,图 7 是随机偏转 YAG 激光毛化轧辊表面形貌示意图。

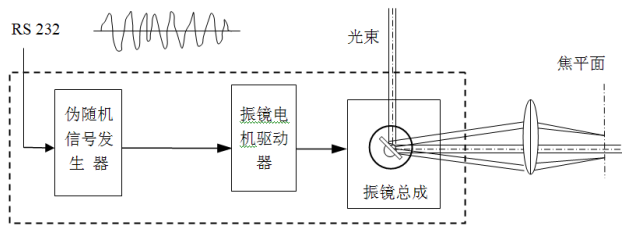


图 6 随机偏转毛化示意图

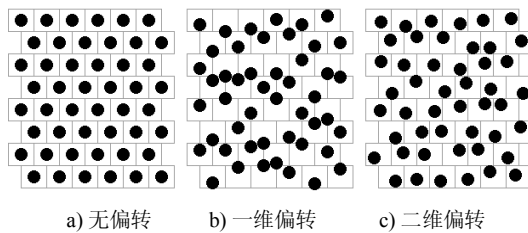


图 7 随机偏转 YAG 激光毛化轧辊表面形貌示意图

C. 可控无规则图像雕刻方法

将二维可控分布技术发展为图像雕刻技术,研究各种离线生成无规则图像的方法,将生成的无规则图像雕刻到轧辊上,从而使毛化微坑在轧辊表面的圆周向或轴向形成无规则分布。图 8 是两种无规则图像 YAG 激光毛化轧辊表面形貌示意图。

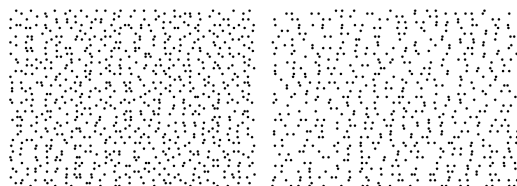


图 8 无规则图像 YAG 激光毛化轧辊表面形貌示意图

将以上三种方法集成可实现毛化微坑更复杂的可控无规则分布。可控无规则分布技术能进一步改善激光毛化板微坑分布的各向异性,它能很好地解决激光毛化板的条纹问题。

III. 可控无规则分布 YAG 激光毛化设备

介绍 JM-3000 YAG 激光毛化设备的工艺参数、技术指标及设备结构。

A. 工艺参数

(1) 辊面可毛化粗糙度范围: $Ra=0.5\sim6.0\mu m$; (2) 激光器最大连续功率: 400 瓦; (3) 激光毛化工作频率: $5\sim35kHz$ (可调); (4) 毛化点密度范围: 线密度: $3\sim9$ 点/mm, 面密度: $9\sim81$ 点/ mm^2 (可调); (5) 辊面毛

化坑径范围: $100\sim250\mu m$; (6) 毛化点凸台高度: $2\sim10\mu m$; (7) 毛化点凸台硬度: $Hv\geq 850$; (8) 毛化点均匀度: $\leq 4\%$; (9) 毛化速度: $2\sim8m^2/h$ 。

B. 技术指标

(1) 可毛化轧辊最大参数: 辊径: 800mm, 辊面宽: 3000mm, 全辊长度: 5000mm, 辊重: 10t; (2) 主轴转速: $50\sim500$ 转/分 (变频无级调速); (3) 纵向溜板进给: $10\sim4000mm/min$ (无级可调); (4) 辊面可毛化粗糙度范围: $Ra=0.5\sim6.0\mu m$ (可调), $\Delta Ra\leq 4\% Ra$; (5) 辊面毛化坑径范围: $100\sim250\mu m$; (6) 激光毛化工作频率: $5\sim35kHz$ (可调); (7) 毛化点凸台高度: $2\sim10\mu m$; (8) 毛化点凸台硬度: $Hv\geq 850$; (9) 整机能耗: ①电耗 $<35kW$, 三相四线制, 380V, 50Hz; ②冷却水: 去离子水或蒸馏水, 70 升/90 天; ③辅助气体: 干燥压缩空气或氮气, 30 升/分; (10) 设备总重: 12t; (11) 设备占地面积: $60m^2$; (12) 工作环境温度: $0^\circ C\sim45^\circ C$; (13) 湿度: $\leq 80\%$; (14) 可每天三班连续工作。

C. 设备结构

JM-3000 YAG 激光毛化设备由六部分组成: 机械系统、激光器系统、控制系统、外光路系统、变频制冷系统和气路系统。

(1) 机械系统

功能: 承载轧辊和激光聚焦头, 实现轧辊的旋转和聚焦头的纵向、横向移动。

结构: 由床头箱、床身、尾架、纵向移动架、横向移动架和托架组成。床头箱包括主轴变频电机等传动部件、编码器、拨盘、前顶尖和润滑系统等, 用于轧辊无级调速、轧辊位置检测、机床润滑; 床身包括床身和导轨, 用于支撑大溜板和尾架; 尾架包括电动尾座及后顶尖, 用于轧辊中心定位; 纵向移动架包括纵向伺服电机、滚珠丝杠及丝母、导轨和大溜板箱体, 用于横向移动架的支撑、纵向无级调速和定位; 横向移动架包括滚珠丝杠及丝母、导轨和小溜板箱体, 用于聚焦头的支撑、纵向无级调速和定位; 托架用于轧辊装卸。

(2) 激光器系统

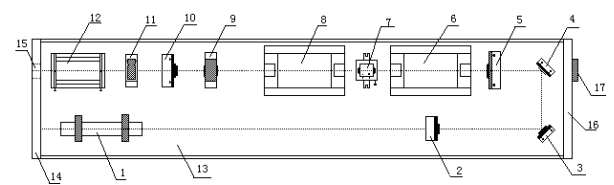


图 9 激光器结构示意图

功能: 激光器谐振腔振荡产生的高能激光束被声光调制器调制产生毛化所需的高能量、高重频脉冲激光束; 扩束系统采用发散——会聚扩束系统, 扩束倍率, 压缩光束发散角。

结构：激光器采用半导体激励的双腔单声光调制器结构，图 9 是其结构示意图。其中：

1: He—Ne 准直激光器,2: He—Ne 准直光阑,3: He—Ne 45°全反镜及调整架,4: He—Ne45°全反镜及调整架,5: 全反镜及调整架,6: B 聚光腔(基准腔),7: 声光 Q 开关及调整架,8: A 聚光腔,9: 光阑,10: 输出镜及调整架,11: 激光功率实时监测,12: 扩束镜及调节架,13: 激光器底座,14: 激光器前端板,15: 出光口,16: 激光器后端板,17: 后端盖。

(3) 控制系统

硬件功能：在主轴同轴方向装一高精度高分辨率的增量编码器（10 万线/周），用于检测轧辊的位置。主轴电机采用变频电机，用变频调速器驱动，转速连续可调。纵向移动采用交流伺服系统，左右移动速度连续可调。横向移动采用交流伺服系统。聚焦头自动跟踪系统是由装在聚焦头上的电感式非接触位移传感器、位置调节器、横向伺服驱动器和横向伺服电机等构成的闭环控制系统。具有自动、手动两种工作方式。手动方式用于装卡轧辊毛化工艺试验，自动方式用于毛化加工；声光调制器调制脉冲激光束脉宽和波形；控制系统各部分有相应的故障报警和保护功能。

激光毛化可控无规则分布软件											
序号	辊长 (mm)	辊径 (mm)	螺距 (mm)	点距 (mm)	转速 (rpm)	组数 (个)	组频 (Hz)	分布	延时率	步长 (mm)	
1	1300	250.00	100	160	240	1	100000	0	0	1000	
雕刻参数(A1-A10)		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
显示参数(B1-B10)		15	7	7	9	0	0	0	0	0	0
生成参数(C1-C10)		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
频率 (Hz)	转速 (rpm)	总时间 (时:分:秒)	毛化时间 (时:分:秒)	剩余时间 (时:分:秒)	毛化长度 (mm)	剩余长度 (mm)	进度 (%)				
20000	24000	0:54:10									
读入 F1	存储 F2	插入 F3	删除 F4	修改 F5	左行 F6	右行 F7	停止 F8	退出 F9			
光闸SF1	气阀SF2	左慢SF3	右慢SF4	左快SF5	右快SF6	加载SF7	显示SF8	生成SF9			
光闸: 关 气阀: 关 加载: 无 分布: 定频											
停止状态, 按 F 9 退出。											
中国科学院力学研究所激光毛化中心											

图 10 激光毛化可控无规则分布软件界面

软件功能：激光毛化的操作；具有规则（矩形、菱形、六边形等）和无规则分布毛化功能；主轴变频电机和纵向、横向交流伺服电机的运行，主轴转速无级可调；图像文件的生成、加载和模拟显示；光闸和气阀的控制。无规则分布毛化功能包含了无规则延时和无规则图像雕刻两种方法。图 10 是激光毛化可控无规则分布软件界面。

(4) 外光路系统

功能：完成光束的传输和聚焦，激光束自激光器射出激光束，经两块 45°全反镜反射到聚焦镜，将光束聚焦到辊面，产生微坑。

结构：外光路系统由 45°全反镜 A、45°全反镜 B 和聚焦头组成。聚焦头包括聚焦镜、保护镜片等。全部外光路都是密封的。图 11 是外光路结构示意图。

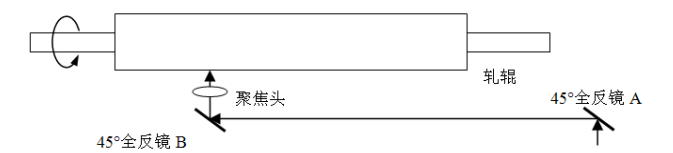


图 11 外光路结构示意图

(5) 变频制冷系统

功能：冷却激光器和声光盒，保证激光毛化功率的稳定性。

结构：由进口变频压缩机、变频器、水泵、水流开关、合资室外风机、温控器及优质不锈钢水箱、管件、连接件组成。图 12 是变频制冷系统结构示意图。

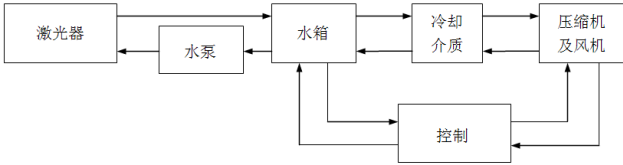


图 12 变频制冷系统结构示意图

(6) 气路系统

功能：激光毛化时熔池微坑造形；对聚焦头起防尘、防油污等保护作用。

结构：由气水分离器、高效过滤器、电磁阀、气压调节器、三通、气嘴组成。图 13 是气路流程图。

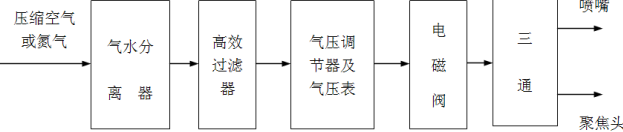


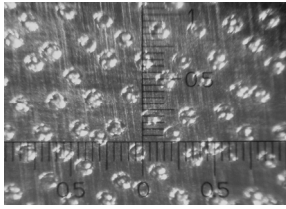
图 13 气路流程图

IV. 应用

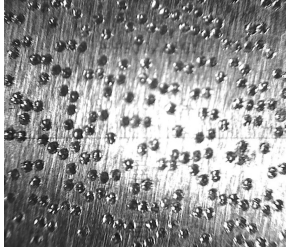
可控无规则分布 YAG 激光毛化设备具有无规则分布毛化功能。控制软件包含了可控无规则延时和可控无规则图像雕刻两种方法。图 14 是几种可控无规则分布形貌图。其中图 14(a)是基于可控无规则延时的轧辊微坑形貌图；图 14(b)是基于可控无规则图像的轧辊微坑形貌图；图 14(c)是基于可控无规则延时的毛化板微坑形貌图。

中科院力学所研制成功无规则分布 YAG 激光毛化技术后，引起了国内很多轧钢厂的广泛兴趣。目前相关设备已在十余家轧钢厂得到成功应用，用户反应强烈。不久，无规则分布 YAG 激光毛化设备还将走出国门，在国际轧辊毛化设备市场上占一席之地。

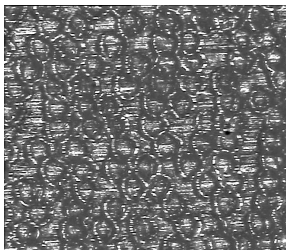
无规则分布 YAG 激光毛化设备除了用于冷轧薄钢板的生产外，还能用于镀锌板、镀锡板、精密板带、不锈钢板带、亚光铝板箔等多种产品的生产。



a) 基于可控无规则延时的轧辊微坑形貌图



b) 基于可控无规则图像的轧辊微坑形貌图



c) 基于可控无规则延时的毛化板微坑形貌图

图 14 几种可控无规则分布形貌图

V. 结论

二维可控无规则分布技术的显著特点是微坑分布的位置是二维可控的，其分布是无规则的。喷丸毛化板和电火花毛化板的无规则分布微坑位置是不可控的，可控无规则分布的激光毛化板的微坑位置是可控的，其再现性和一致性更好。

无规则分布 YAG 激光毛化技术消除了“莫尔条纹”，国际上首次用激光毛化实现电子束毛化的无规则微坑分布的效果。

二维可控分布技术和二维可控无规则分布技术将形成一种新型的离散化激光加工方法。该方法不仅用于优质毛化冷轧薄板的生产，还可用于内燃机缸套（体）内壁的激光雕刻以节能减排、印刷用陶瓷网纹辊和版辊的激光雕刻、花纹板和高档亚光装饰板的生产，这将大大扩大激光毛化技术的应用领域。

致谢

本论文获“中国科学院支持天津滨海新区建设科技行动计划项目——新型全固态激光毛化技术开发及推广应用（TJZX1-YW-14）”的支持。

REFERENCES

- [1] Zhao Fuling and GuoJianying, “Application of non-traditional technologies in the surface texturing technology,” *Electromachining*, (2), pp. 4-9, 1998 (in Chinese).
- [2] O.Elkoca, “A study on the characteristics of electrical discharge textured skin pass mill work roll,” *Surface & Coating Technology*, vol. 202, pp. 2765-2774, 2008.
- [3] L. M. Vilhena, M. Sedlacek, B. Podgornik, et al, “Surface texturing by pulsed Nd:YAG laser,” *Tribology International*, vol. 42, pp. 1496-1504, October 2009.
- [4] Jianliang Li, Dangsheng Xiong, Jihui Dai, et al, “Effect of surface laser texture on friction properties of nickel-based composite,” *Tribology International*, (5-6), vol. 43, pp. 1193-1199, 2010.
- [5] Xichang, Wang, Shuili, Gong, Guo Enming, etc, “Electron beam surf-sculpt technology and its application in composites manufacturing field,” *Manufacturing Technology*, (z1), pp. 53-55, 2009 (in Chinese).
- [6] Guohui Cao, Wansheng Zhao, Zhenlong Wang, “Comparative study of cold roll texturing,” *ELECTROMACHINING & MOULD*, (4), pp. 1-5, 2004 (in Chinese).
- [7] (Germany) Walte Zimnik etc, Yirong Sun translation, “Meticulous texturing—a new method of manufacturing texturing steel sheet,” *World Iron & Steel*, (3), pp. 44-47, 1999 (in Chinese).
- [8] Zhengyang Li, Mingjiang Yang, Wenjin Liu, et al, “Investigation on crater morphology by high repetitive rate YAG laser-induced discharge texturing,” *Surface and Coatings Technology*, (14-15), vol. 200, pp. 4493-4499, April 2006.
- [9] Zhengyang Li, Mingjiang Yang, Minlin Zhong, et al, “Investigation on Depth of Heat affected Zone of Discharge Spot by High Repetitive Rate YAG Laser-induced Discharge Texturing,” *Surface Review and Letters*, (4), vol. 13, pp. 403-411, 2006.
- [10] Jian Zhan, Mingjiang Yang, “Investigation on crater morphology by YAG laser guiding discharge texturing,” *Applied Laser*, (2), vol. 27, pp. 85-87, 2007 (in Chinese).
- [11] Peng Lai, Qingmao Zhang, “Reviews and prospects of laser texturing technology,” *Laser & Optoelectronics Progress*, (4), vol. 46, pp. 53-59, 2009 (in Chinese).
- [12] Xu Wang, Bing Zhao, Chunfang Liu, “Tests research on automobile cold rolled drawing laser texturing steel plate,” *Automobile Technology & Material*, (8), pp. 16-20, 1996 (in Chinese).
- [13] Hongcai Wang, Mingjiang Yang, “A Numerical Control System of Controllable Distribution on YAG Laser-texturing Equipment,” *Computer Automated Measurement & Control*, (3), vol. 9, pp. 11-13, 2001 (in Chinese).
- [14] Hongcai Wang, Mingjiang Yang, A laser processing system for the texturing roller surface with controllable micro-craters, China Patent, ZL001282735, 2004.6.2 (in Chinese).
- [15] Hongcai Wang, Mingjiang Yang, Linhua Peng, A laser process system and method of irregular deflection texturing spots on the roller class surface, China Patent, ZL2005101167506, 2009.2.18 (in Chinese).
- [16] Hongcai Wang, Mingjiang Yang, Linhua Peng, A laser process system and method of peripheral direction irregular texturing spots on the roller class surface, China Patent, ZL2005101171588, 2009.4.8 (in Chinese).